

Uitbreiding en calibratie van mechanistisch model voor gehinderde en compressiebezinking voor actief slib met behulp van doorgedreven experimenten

Jeriffa De Clercq a,c, Ingmar Nopens b, Jacques Defrancq c, Peter A. Vanrolleghem b,d

a Faculty of Applied Engineering Sciences, University College Ghent, Schoonmeersstraat 52, 9000 Gent, Belgium

b BIOMATH, Ghent University, Coupure Links 653, B-9000 Ghent, Belgium

c Department of Chemical Engineering and Technical Chemistry, Ghent University, Technologiepark 914, 9052 Zwijnaarde, Belgium

d modelEAU, Dépt de génie civil, Université Laval, Québec, G1K 7P4, QC, Canada
e-mail: jeriffa.declercq@hogent.be

Trefwoorden: mechanistisch model, sedimentatie, actief slib, gehinderde bezinking, compressie, inverse modellering

Op dit ogenblik bestaat er geen mechanistisch model in de afvalwaterwereld dat op een accurate manier het batchbezinkingsgedrag van actief slib beschrijft. Een dergelijk model, gebaseerd op fundamentele massa- en krachtenbalansen voor water en partikels, wordt uitgebreid en toegepast in deze bijdrage. Het model beschrijft zeer goed batchbezinkingsexperimenten voor slib van twee verschillende rwzi's.

Het mechanistisch model bevat de Kynch batchdichtheidsfunctie f_{bk} (gehinderde bezinking) en een effectieve partikelspanningsfunctie σ_e (compressie). Initiële bezinkingssnelheden werden uit gedetailleerde ruimte/tijd dynamische partikelconcentratieprofielen afgeleid, welke werden gemeten met behulp van een radiotracer. Verder werd inverse modellering toegepast op dezelfde dataset. Beide berekeningen toonden aan dat (1) de Cole machtsfunctie aanvaardbare resultaten opleverde en (2) een enkele partikelspanningsfunctie kon worden afgeleid op voorwaarde dat een tijdsafhankelijke compressiepartikelconcentratie C_c in acht werd genomen.

Deze laatste treedt op net onder het slibdeken en kan rechtstreeks worden berekend uit de partikelconcentratieprofielen. Gegeven dit tijdsafhankelijk karakter, werd een uniform logaritmisch verband gevonden tussen enerzijds de effectieve partikelspanning en anderzijds het verschil tussen de partikelconcentratie en de compressiepartikelconcentratie. De beschrijvende kracht van het model impliceert een mooi potentieel tot ruimere toepasbaarheid.

De efficiëntie van het actief slibproces is in grote mate afhankelijk van de bezinkbaarheid van het slib. Het inkomende afvalwater en de operationele condities van de bioreactoren beïnvloeden de samenstelling van de microbiële vlok en aldus haar bezinkingseigenschappen. Kennis van deze laatste is essentieel voor een goed ontwerp en operatie van nabezinktanks (Jin et al., 2003; Mines et al., 2001) en wordt vaak gekwantificeerd aan de hand van batchbezinkingstesten. Op dit moment is er echter geen (mechanistisch) model beschikbaar in de afvalwaterindustrie dat de opgemeten batchbezinkingscurven accuraat beschrijft.

De meeste modellen zijn empirisch van aard (Vesilind, 1968; Takacs et al., 1991; Dupont en Henze, 1992; Hartel en Popel, 1992; Otterpohl en Freund, 1992; Cho et al., 1993) en beschrijven ofwel (1) enkel gehinderde bezinking, (2) gehinderde en compressiebezinking en (3) gehinderde bezinking bij lage

partikelconcentraties. De Vesilind en Takacs functies worden het vaakst gebruikt. Ze worden respectievelijk gegeven door:

$$V_s = V_0 e^{-nC},$$

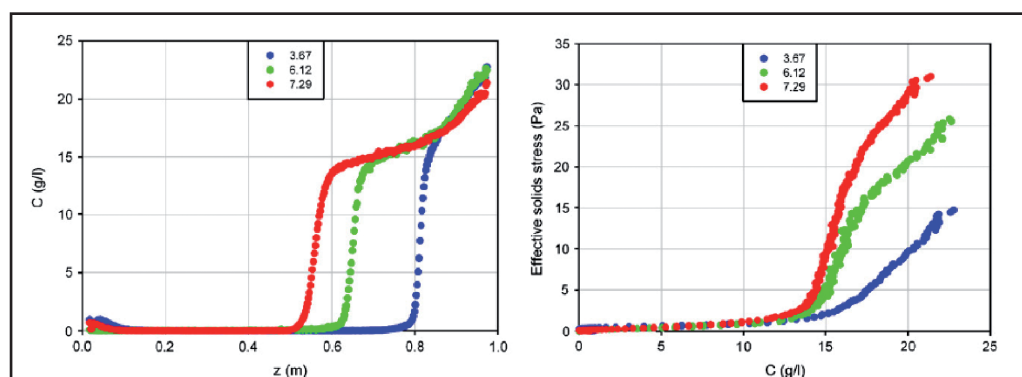
$$V_s = \min(V_{0\max}, V_0(e^{-r_h(C-C_{\min})} - e^{-r_p(C-C_{\min})})).$$

Deze empirische modellen hebben echter geen relatie met de fysische eigenschappen van de slibvlokken en slib-water interactie. Kinnear (2002) was een van de eersten die dit erkende en op zoek ging naar een verband tussen de bezinkingssnelheid en fysische eigenschappen van het slib. Het voorgestelde model was echter niet in staat een hele bezinkingscurve (i.e. over het hele concentratiebereik) te beschrijven. Er is dus nog steeds nood aan een meer fundamentele en wetenschappelijk gefundeerde manier om batchbezinkingscurven te beschrijven.

In andere toepassingsdomeinen (bv. geflocculeerde sedimenten) werd reeds meer onderzoek verricht naar het modelleren van het bezinkingsgedrag. Het grote verschil met deze mechanistische modellen is het gebruik van andere uitdrukkingen voor de gehinderde bezinkingsflux, i.e. de Kynch batchdichtheidsfunctie f_{bk} en de effectieve partikelspanning σ_e (Shirato et al., 1970; Shih et al., 1986; Font, 1991; Bergstrom, 1992; Holdich en Butt, 1997; Diplas en Papanicolaou, 1997; Zheng en Bagley, 1998, 1999; Karl en Wells, 1999; Burger et al., 2000). Daar waar de Kynch batchdichtheidsfunctie werd beschreven door een veelheid aan uitdrukkingen, werd de effectieve partikelspanning veelal beschreven met machts- of exponentiële wetten. Een gedetailleerd overzicht wordt gegeven in De Clercq (2006).

Een mechanistisch model is gebaseerd op het behoud van massa en moment voor zowel de water- als de partikelfase. De krachten die werken op de partikels zijn zwaartekracht, gewichtloosheid, vloeistofdruk, wrijving en effectieve partikelkrachten. Het model voor de batchbezinkingsnelheid van actief slib wordt, mits enkele aannames en de invoering van de Kynch batchdichtheidsfunctie $f_{bk}(C)$ en de effectieve partikelspanning $\sigma_e(C)$ (Bustos et al., 1999; De Clercq, 2006), gegeven door een tweede orde partiële differentiaalvergelijking in tijd en ruimte:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\frac{\partial f_{bk}}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left(f_{bk}(C) \frac{\rho_s}{\Delta \rho g} \frac{d\sigma_e}{dC} \frac{\partial C}{\partial z} \right)$$

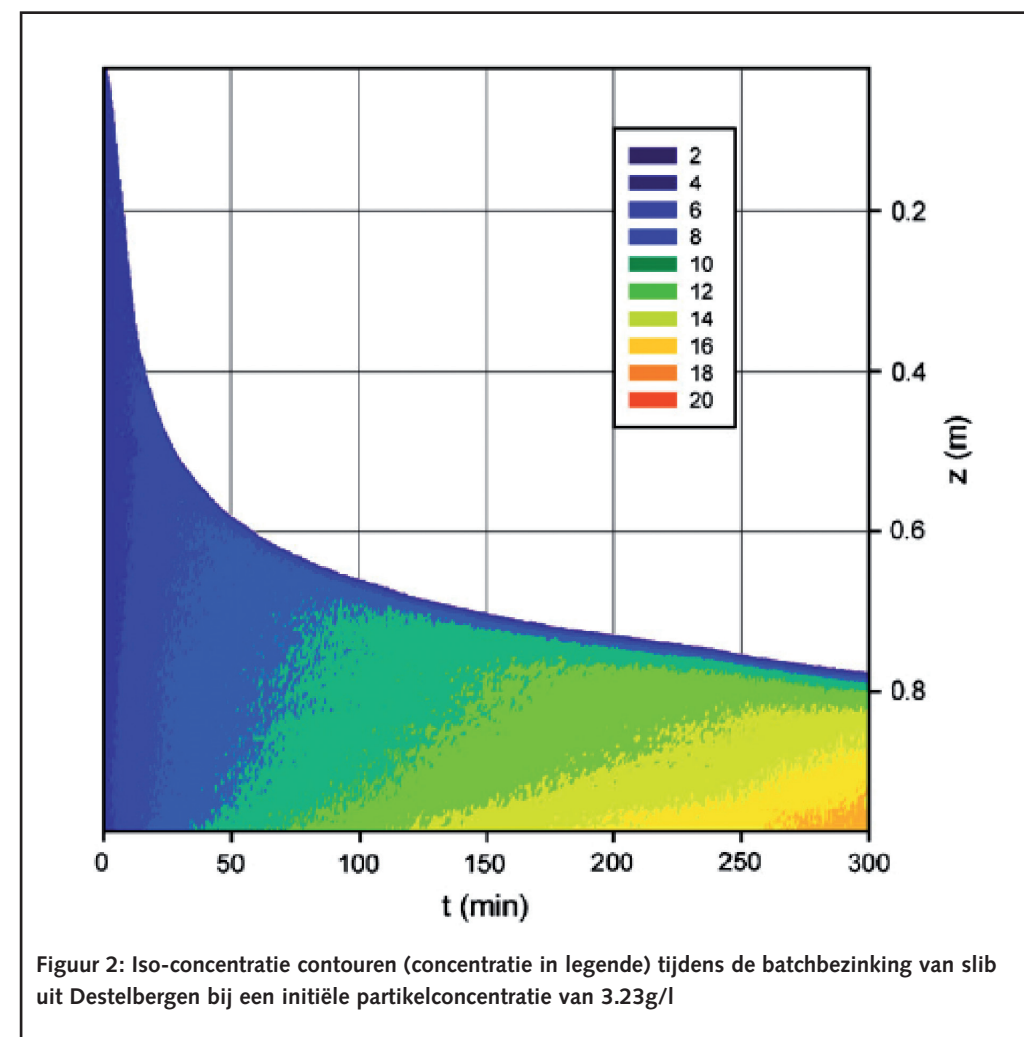


Figuur 1: Evenwichtspartikelconcentratieprofielen (links) en effectieve partikelspanning versus partikelconcentratie (rechts) voor verschillende initiële concentraties (zie legende) voor het slib uit Deinze (De Clercq et al., 2005)

Wanneer C kleiner is of gelijk aan C_c (i.e. de compressiepartikelconcentratie of die concentratie waarboven compressie optreedt en een effectieve partikelspanning bestaat), dan vervalt de tweede term in het rechterlid en treedt aldus enkel gehinderde bezinking op. Wanneer C groter is dan C_c , dan treedt naast gehinderde bezinking ook een effectieve partikelspanning op die de bezinkingsnelheid beïnvloedt. In deze bijdrage worden de experimentele data van De Clercq et al. (2005) gebruikt om de meest geschikte uitdrukking te vinden voor de Kynch batchdichtheidsfunctie $f_{bk}(C)$ en de effectieve partikelspanning $\sigma_e(C)$ en hun parameters te schatten. Het model dient in staat te zijn volgende geobserveerde fenomenen te beschrijven:

- gehinderde - en compressiebezinking;
- gehinderde bezinkingsnelheden nemen af met toenemende initiële partikelconcentraties;
- de compressiepartikelconcentratie is tijdsafhankelijk.

De parameters van de Kynch batchdichtheidsfunctie en de effectieve partikelspanning worden bekomen uit vastgestelde initiële bezinkingsnelheden en inverse modellering, waarbij alle concentratieprofielen in rekening worden gebracht en niet enkel deze bij evenwicht.



Figuur 2: Iso-concentratie contouren (concentratie in legende) tijdens de batchbezinking van slib uit Destelbergen bij een initiële partikelconcentratie van 3.23g/l

Slib	C_0 (g/l)	V_{hindered} (m/d)	ρ_s (kg/m ³)
Destelbergen	2.40	69.18	1762
	3.23	44.36	1753
	4.30	24.67	1714
Deinze	3.67	82.93	1943
	6.12	24.45	1898
	7.29	15.28	1881

Tabel 1: Partikelconcentraties, initiële gehinderde bezinkingssnelheden en dichtheden van de batchbezinkingsexperimenten

MATERIAAL EN METHODEN

Batch bezinkingsexperimenten

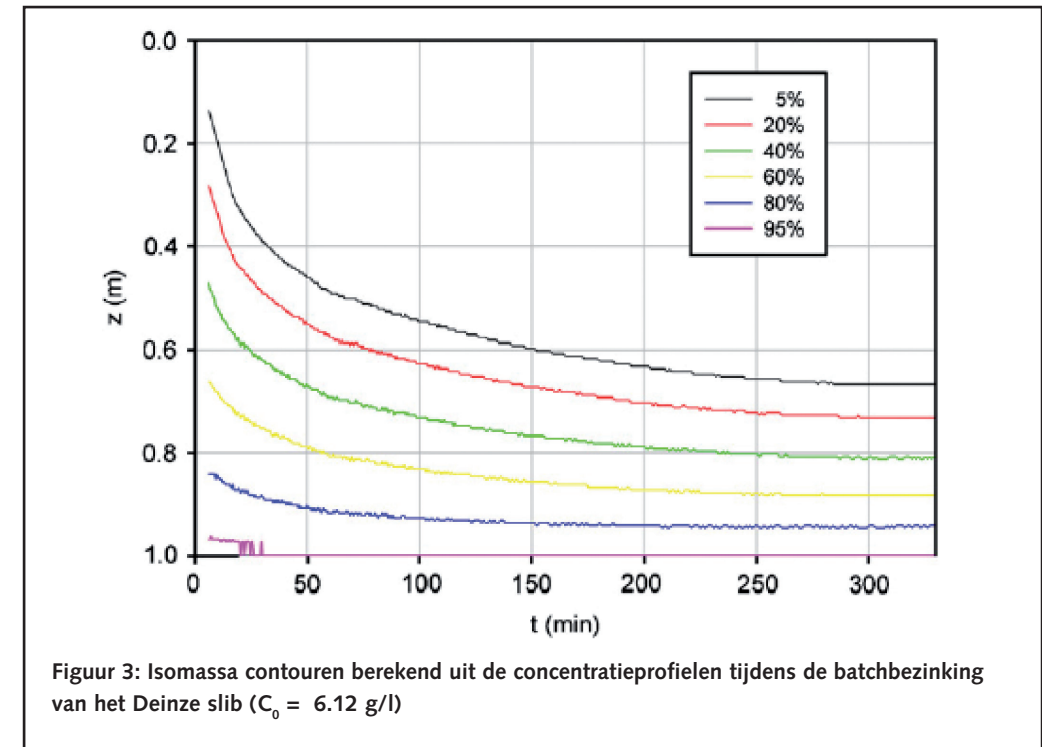
De Clercq et al. (2005) ontwikkelden een nieuwe meettechniek die toeliet om concentratieprofielen tijdens batchbezinkingsexperimenten met hoge accuraatheid in de tijd op te meten. Deze techniek, gebruik makend van een radiotracer en twee gammaradiatiecamera's, werd toegepast op slib van twee RWZIs in de omgeving van Gent (Destelbergen en Deinze). Voor elk slib werd een dynamisch partikelconcentratieprofiel opgemeten bij verschillende initiële concentraties. De profielen bevestigden niet enkel het optreden van gehinderde bezinking, maar de evenwichtsconcentratieprofielen en de isoconcentratielijnen bevestigden ook het optreden van compressie omdat:

- de evenwichtsprofielen een toenemende concentratie vertoonden in de diepte (Fig. 1, links), daar waar bij een suspensie, die enkel gehinderde bezinking vertoont, een constante concentratie zich instelt met een bezinkingssnelheid gelijk aan nul;
- Wanneer enkel gehinderde bezinking optreedt, vertrekken alle isoconcentratieprofielen uit de oorsprong en zijn deze lineair; wanneer compressie optreedt, worden deze profielen niet-lineair en ontstaan ze aan de bodem van de bezinkingskolom op verschillende tijdstippen (Concha en Burger, 2002; Font en Laveda, 2000); Fig. 2 illustreert dit.

Compressiepartikelconcentraties bij evenwicht kunnen worden geschat uit het evenwichtsprofiel (Figuur 1, rechts) door de differentiaal gelijk te stellen aan 0. Afhankelijk van het slib en de initiële concentratie worden waarden tussen 7 en 10 g/l gevonden. De isoconcentratieprofielen geven weer dat CC initieel rond de initiële partikelconcentratie ligt. Deze observaties resulteerden in een tijdsafhankelijke compressiepartikelconcentratie zoals werd gesuggereerd door Diplas en Papanicolaou (1997) en Kinnear (2002). De berekende initiële bezinkingssnelheden worden, samen met de pycnometrische dichtheidmetingen, getoond in Tabel 1.

SCHATTING VAN DE MODELPARAMETERS

Parameters werden geschat gebruik makende van het Levenberg-Marquardt algoritme en door het minimaliseren van de doelfunctie:



Figuur 3: Isomassa contouren berekend uit de concentratieprofielen tijdens de batchbezinking van het Deinze slib ($C_0 = 6.12$ g/l)

$$J(\theta) = \sum_{i=1}^N (y_i - \widehat{y}_i(\theta))^2$$

Meetfouten waren Gaussiaans van aard, ongecorrleerd en vertoonden een constante variantie zodat een kleinste kwadratenmethode gelegitimeerd is. De parametervector θ bevat de parameters van de Kynch batchdichtheidsfunctie en/of de effectieve partikelspanningsfunctie.

INVERSE MODELLERING

Door de concentratieprofielen op een gegeven tijdstip te integreren over de hoogte, kunnen de hoogtes worden berekend waarboven zich een zeker percentage van de totale partikelmasa bevindt. De evolutie van deze hoogtes in de tijd voor een bepaald percentage geeft aanleiding tot isomassaprofielen die de totale massa procentueel verdelen. Dergelijke profielen worden weergegeven in Fig. 3.

Per definitie is de geobserveerde en netto (som van neerwaartse gehinderde bezinking en opwaartse compressie) bezinkingssnelheid gelijk aan de gradiënt van de isomassa contour op een bepaald tijdstip. Voor elke isomassa contour wordt de bezinkingssnelheid berekend. Bovendien is op elk punt van de isomassa contour de partikelconcentratie gekend en met behulp van een gekende Kynch batchdichtheidsfunctie kan uit de berekende bezinkingssnelheid een effectieve partikelspanning worden berekend m.b.v. de volgende uitdrukking:

$$v_s = \frac{f_{bk}}{C} \left(1 - \frac{\rho_s}{\Delta \rho g C} \frac{d\sigma_e}{dC} \frac{\partial C}{\partial z} \right)$$

RESULTATEN EN DISCUSSIE

Kynch batchdichtheidsfunctie

Verschillende Kynch batchdichtheidsfuncties zijn beschikbaar in de literatuur (Shirato et al., 1970; Shih et al., 1986; Font, 1991; Bergstrom, 1992; Holdich en Butt, 1997; Diplas en Papanicolaou, 1997; Zheng en Bagley, 1998, 1999; Karl en Wells, 1999; Burger et al., 2000). Geobserveerde, initiële bezinkingssnelheden werden gebruikt om de parameters van de respectievelijke functies te schatten.

Hiertoe werden functiewaarden berekend uit de initiële bezinkingssnelheden en de overeenkomstige partikelconcentraties en geconfronteerd met de geobserveerde waarden. Een kleinste kwadratenmethode werd gebruikt om de parameters te bepalen die resulteerde in de beste modelvoorspelling. Uit deze analyse bleek dat de Vesilind-functie significant beter was dan acht andere onderzochte functies binnen een concentratiebereik van 0-25 g/l.

Vervolgens werd inverse modellering gebruikt, in combinatie met de concentratieprofielen, om na te gaan of de Vesilind-functie inderdaad de geschikte functie is om gehinderde bezinking te beschrijven. De aanwezigheid van ruis op de partikelconcentratieprofielmetingen maakt de gradiëntberekening niet evident. Bovendien gaat onze interesse uit naar de effectieve partikelspanning en niet de gradiënt ervan. Daarom kan voorgaande uitdrukking worden geïntegreerd tot:

$$\sigma_e = \sum_{z=0}^{z=H} \left(1 - \frac{V_s}{f_{bk}/C} \right) \frac{\Delta \rho g C}{\rho_s} \Delta z$$

De resultaten van deze berekeningen bij gebruik van de Vesilind-functie toont dat geen unieke functie voor de effectieve partikelspanning kan worden gevonden, die in staat is alle datapunten te beschrijven, zelfs niet wanneer een tijdsafhankelijke compressieconcentratie wordt gebruikt. Vergelijking van de berekende waarden met die berekend uit het evenwichtsconcentratieprofiel (Fig. 1, rechts) resulteerde ook in de conclusie dat de Vesilind-functie aanleiding gaf tot te lage effectieve partikelspanningswaarden.

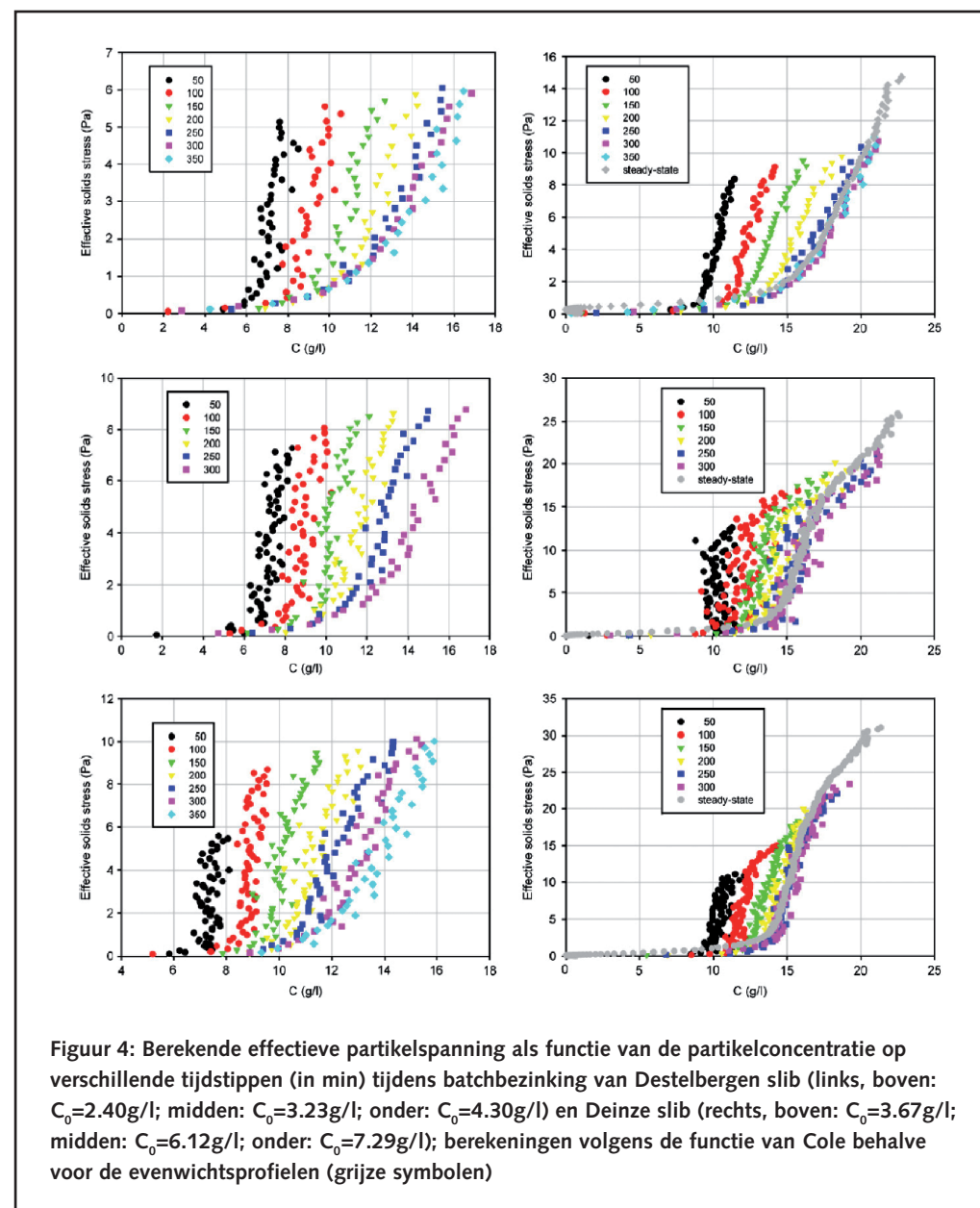
Hieruit kan worden geconcludeerd dat de Vesilind-functie ontoereikend is voor de beschrijving van de volledige batchbezinkingscurve. Bovendien kon worden afgeleid dat, om een unieke effectieve partikelspanningsfunctie, gebruikmakende van een tijdsafhankelijke compressiepartikelconcentratie, de bezinkingssnelheid bij concentraties hoger dan de initiële groter moesten zijn dan deze voorspeld door de Vesilind-functie. De machtsfunctie van Cole (1968) geeft aanleiding tot hogere bezinkingssnelheden en kan aldus dienen als alternatief:

$$f_{bk} = aC^{-b}$$

Deze functie geeft echter aanleiding tot een oneindige flux bij een concentratie van 0 en heeft geen maximum. Dit kan worden opgelost door ofwel een maximum bezinkingssnelheid te definiëren of door een andere functie te gebruiken bij lage concentraties. Hier werd geopteerd voor een maximale bezinkingssnelheid van 250 m/d. De resultaten van de inverse modellering van deze functie worden gegeven in Figuur 4.

Deze berekeningen tonen een goede overeenkomst met de evenwichtswaarden en het bestaan van een unieke effectieve partikelspanningsfunctie als een tijdsafhankelijke compressiepartikelconcentratie wordt gebruikt (overeenkomstig een verschuiving van de σ_e -curven in Figuur 4 naar hogere concentraties op verschillende tijdstippen).

Hieruit kan besloten worden dat de Cole-functie betere resultaten oplevert dan de Vesilind-functie. Ze werd verder gebruikt als Kynch batchdichtheidsfunctie. De tijdsafhankelijke compressiepartikelcon-

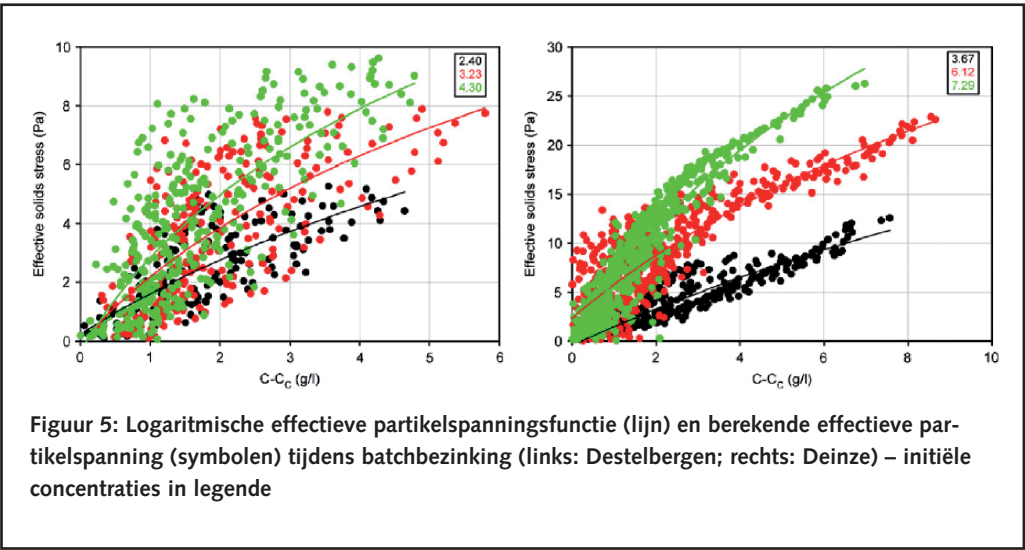


Figuur 4: Berekende effectieve partikelspanning als functie van de partikelconcentratie op verschillende tijdstippen (in min) tijdens batchbezinking van Destelbergen slib (links, boven: $C_0=2.40\text{g/l}$; midden: $C_0=3.23\text{g/l}$; onder: $C_0=4.30\text{g/l}$) en Deinze slib (rechts, boven: $C_0=3.67\text{g/l}$; midden: $C_0=6.12\text{g/l}$; onder: $C_0=7.29\text{g/l}$); berekeningen volgens de functie van Cole behalve voor de evenwichtsprofielen (grijze symbolen)

tratie bevindt zich net onder het slibdeken, zoals reeds eerder vermeld door De Clercq et al. (2005). Alvorens een uitdrukking voor de effectieve partikelspanning voor te stellen, dient eerst de evolutie van de compressiepartikelconcentratie worden afgeleid uit de partikelconcentratieprofielen.

Evolutie van de compressiepartikelconcentratie C_c

De tijdsafhankelijke compressiepartikelconcentratie werd als volgt afgeleid uit de partikelconcentratieprofielen. In de nabijheid van het slibdeken treedt een discontinuïteit op, wat feitelijk neerkomt op een grote concentratiegradiënt rond de initiële partikelconcentratie. Net onder het slibdeken is de gradiënt minder uitgesproken. Indien de concentratie aan het slibdeken zou worden genomen als compressiepar-



Figuur 5: Logaritmische effectieve partikelspanningsfunctie (lijn) en berekende effectieve partikelspanning (symbolen) tijdens batchbezinking (links: Destelbergen; rechts: Deinze) – initiële concentraties in legende

tikelconcentratie, dan zou deze constant blijven bij de initiële partikelconcentratie gedurende het gehele experiment, wat de voorgaande bevindingen tegensprekt. Daarom wordt voorgesteld om de concentratie net onder de discontinuïteit, waar de gradiënt is gestabiliseerd, te aanzien als C_c . Er wordt voorgesteld om C_c te definiëren als die concentratie in het slibdeken waar de concentratiegradiënt een waarde kleiner dan 200 g/l/m aanneemt. Deze kritische waarde werd afgeleid uit de berekeningen van de concentratiegradiënten van de gemeten partikelconcentratieprofielen. Met behulp van deze tijdsafhankelijke compressiepartikelconcentratie kan een effectieve partikelspanningsfunctie worden afgeleid.

Effectieve partikelspanningsfunctie σ_e (compressie)

Voor elk experiment werd de effectieve partikelspanning uitgezet tegenover het verschil tussen de partikelconcentratie en de compressiepartikelconcentratie. Vooral de experimenten bij een hoge initiële partikelconcentratie toonden dat de meest frekwent gebruikte machts- of exponentiële functies niet in staat waren de effectieve partikelspanning te beschrijven, gezien deze functies een grotere gradiënt voorspellen voor hogere concentraties, wat hier niet het geval is (Figuur 4). Daarom werd de volgende logaritmische functie met twee parameters α en β gefit aan de berekende effectieve partikelspanningswaarden gebruik makende van een kleinste kwadratenmethode:

$$\sigma_e = \alpha \ln\left(\frac{C - C_c + \beta}{\beta}\right)$$

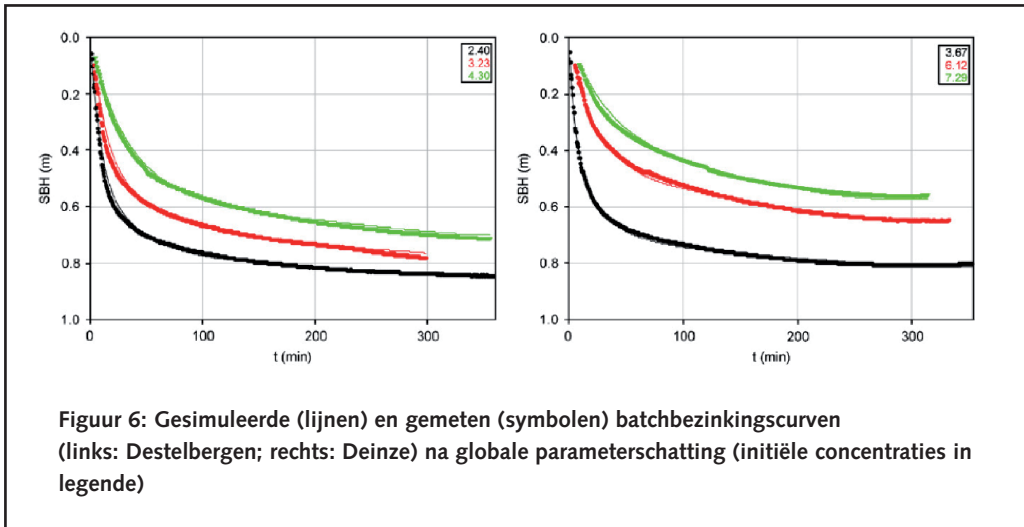
Er werd nagegaan of een of meerdere parameters constant konden worden ondersteld voor alle experimenten uitgevoerd met eenzelfde slib. Statistisch gezien was dit enkel mogelijk voor α . De resulterende functies en de berekende effectieve partikelspanningswaarden worden gegeven in Figuur 5. Hieruit kan afgeleid worden dat de functie goede voorspellingen oplevert.

Voorspelling/simulatie van de batchbezinkingsexperimenten

De inverse modelleringsoefening toonde dat een machtsfunctie voor de Kynch batchdichtheidsfunctie in combinatie met een logaritmische functie voor de effectieve partikelspanning kan worden gebruikt om batchbezinkingsexperimenten te beschrijven. Simulatie van de concentratieprofielen met de bekomen submodellen en onafhankelijk geschatte parameters gaf echter geen aanleiding tot bevredigende resultaten.

Destelbergen		$C_0 = 2.40 \text{ g/l}$	$C_0 = 3.23 \text{ g/l}$	$C_0 = 4.30 \text{ g/l}$
a	433			
b	0.94			
α	7.00			
β		2.90	1.76	1.17
Deinze		$C_0 = 3.67 \text{ g/l}$	$C_0 = 6.12 \text{ g/l}$	$C_0 = 7.29 \text{ g/l}$
a	3588			
b	1.70			
α	18.24			
β		8.27	2.60	2.12

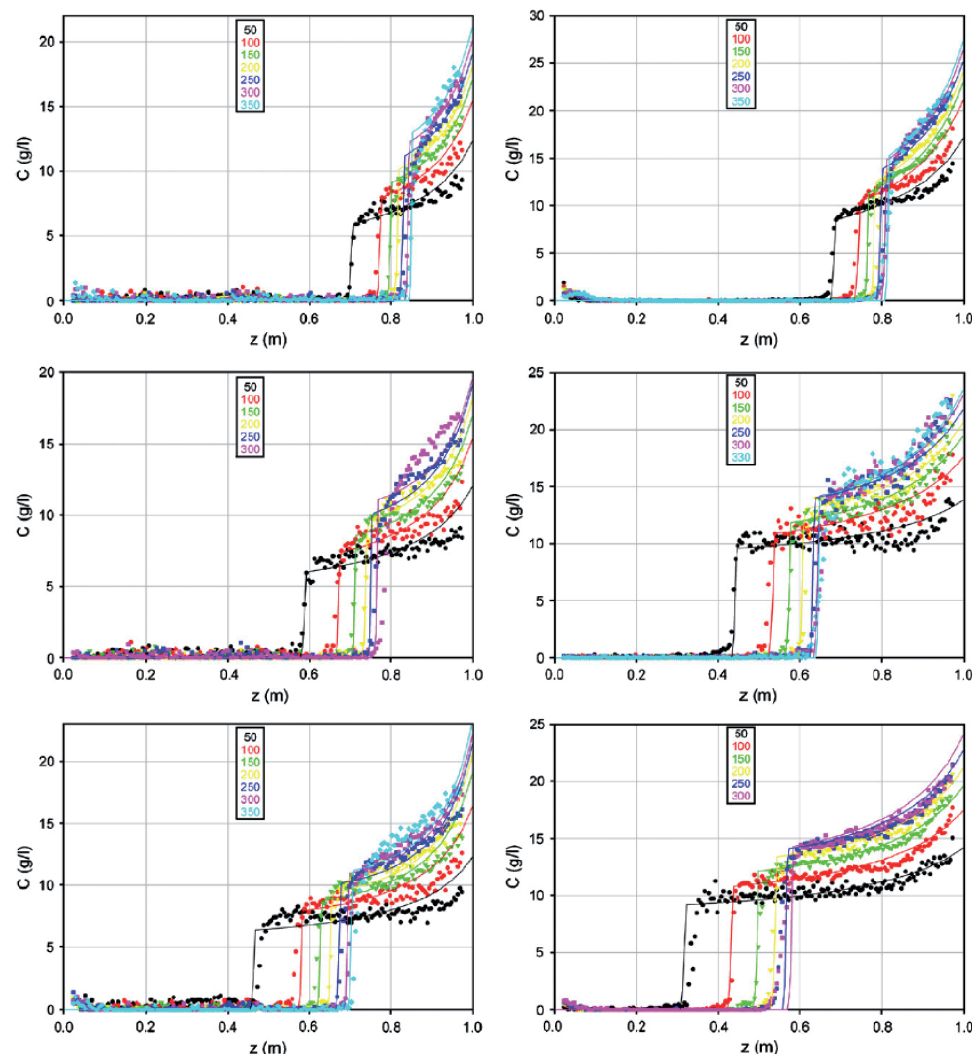
Tabel 2.: Geschatte parameters voor de Kynch batchdichtheidsfunctie en de logaritmische effectieve partikelspanningsfunctie



Figuur 6: Gesimuleerde (lijnen) en gemeten (symbolen) batchbezinkingscurves (links: Destelbergen; rechts: Deinze) na globale parameterschatting (initiële concentraties in legende)

Daarom werd een globale parameterschatting uitgevoerd, waarbij die parameterwaarden als initiële waarden werden gebruikt. Als doelfunctie werd een kleinste kwadratenom gebruikt tussen de geobserveerde en voorspelde concentratieprofielen. Noteer dat dit aanleiding gaf tot een parameterschatting met 250.000 datapunten. De optimale parameterwaarden worden weergegeven in Tabel 2.

Gemeten en voorspelde batchbezinkingscurves worden weergegeven in Figuur 6. Partikelconcentratieprofielen op verschillende tijdstippen worden gegeven in Figuur 7.



Figuur 7: Gesimuleerde (lijnen) en gemeten (symbolen) partikelconcentratieprofielen op verschillende tijdstippen (in min – zie legende) tijdens batchbezinkingsexperimenten voor Destelbergen slib (links; boven: $C_0=2.40\text{g/l}$; midden: $C_0=3.23\text{g/l}$; onder: $C_0=4.30\text{g/l}$) en Deinze slib (rechts; boven: $C_0=3.67\text{g/l}$; midden: $C_0=6.12\text{g/l}$; onder: $C_0=7.29\text{g/l}$)

Het batchbezinkingsmodel beschrijft de partikelconcentratieprofielen en de batchbezinkingscurves zeer goed. Het batchbezinkingsmodel, gekarakteriseerd door de Kynch batchdichtheidsfunctie, de effectieve partikelspanningsfunctie en de evolutie van de compressiepartikelconcentratie is weergegeven in Figuur 7 voor beide slibs.

De uitstekende beschrijving van de partikelconcentratieprofielen opent perspectieven voor een bredere toepasbaarheid van het model.

- Door batchbezinkingsexperimenten uit te voeren bij bezinkingsnelheden kleiner dan 250 m/d (i.e. in het stijgende gedeelte van de flux functie) kan een Kynch batchdichtheidsfunctie worden gevonden die ook de bezinking (en de concentratieprofielen) bij deze lage partikelconcentraties kan beschrijven.
- In de praktijk zijn extensieve datasets als deze die hier werden gebruikt, niet voorhanden. Bezinkingscurves bij verschillende initiële concentraties zijn dat echter wel. Tenminste drie zulke curves zijn nodig om de parameters van het voorgestelde model te schatten.
- Wanneer het bezinkingsgedrag van een slib is gekarakteriseerd door het schatten van de modelparameters, kan dit bezinkingsmodel worden gebruikt voor het simuleren van continue bezinking (1D, 2D en 3D). De tijdsafhankelijke compressiepartikelconcentratie kan bij continue bezinking worden genomen in de nabijheid van het slibdeken zoals aangetoond in De Clercq (2006). ■

CONCLUSIES

De batchbezinkingsexperimenten van De Clercq (2006) werden gebruikt om functies op te stellen voor de Kynch batchdichtheidsfunctie en de effectieve partikelspanningsfunctie. Inverse modellering, in combinatie met berekende initiële bezinkingsnelheden, illustreerden dat een machtsfunctie voor de Kynch batchdichtheidsfunctie aanleiding gaf tot een unieke effectieve partikelspanningsfunctie met een tijdsafhankelijke compressiepartikelconcentratie.

Dit laatste fenomeen was reeds waargenomen bij batchbezinkingsexperimenten, alsook het feit dat deze concentratie zich vlakbij de slibdekenhoogte bevindt. Inspectie van de batchbezinkingsexperimenten liet een eenvoudige bepaling van de evolutie van de compressiepartikelconcentratie toe. Inverse modellering werd vervolgens toegepast om, gegeven de Kynch batchdichtheidsfunctie en de evolutie van de compressiepartikelconcentratie, de effectieve partikelspanningsfunctie te bepalen. Deze laatste vertoonde een logaritmisch verloop in functie van de partikelconcentratie. De parameters van beide functies werden vervolgens geschat, gebruik makende van de concentratieprofielen.

Het voorgestelde model beschrijft het bezinkingsgedrag significant beter dan eender welk model uit de literatuur en dit voor slib van twee verschillende rwzi's.

Referenties

- Bergstrom, L., 1992. Sedimentation of flocculated alumina suspensions: g-ray measurements and comparison with model predictions. J. Chem. Soc. Farad. Trans. 88 (21), 3201–3211.
- Bürger, R., Concha, F., Tiller, F.M., 2000. Applications of the phenomenological theory to several published experimental cases of sedimentation processes. Chem. Eng. J. 80, 105–117.
- Bustos, M.C., Concha, F., Bürger, R., Tory, E.M., 1999. Sedimentation and Thickening, Phenomenological Foundation and Mathematical Theory. Mathematical Modelling: Theory and Applications, vol. 8. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- Cho, S.H., Colin, F., Sardin, M., Prost, C., 1993. Settling velocity of activated sludge. Water Res. 27, 1237–1242.
- Cole, R.F., 1968. Experimental evaluation of the Kynch theory. Ph.D. Thesis, University of North Carolina, Chapel Hill.
- Concha, F., Bürger, R., 2002. A century of research in sedimentation and thickening. KONA Powder and Particle 20, 38–70.
- De Clercq, J., 2006. Batch and continuous settling of activated sludge: in-depth monitoring and 1D compression modelling. Ph.D. Thesis, Department of Chemical Engineering, Ghent University, ISBN 90-8578-093-4. Download: http://biomath.ugent.be/publications/download/declercqjeriffa_phd.pdf.
- De Clercq, J., Jacobs, J., Kinnear, D.J., Nopens, I., Dierckx, R.A., Defrancq, J., Vanrolleghem, P.A., 2005. Detailed spatio-temporal solids concentration profiling during batch settling of activated sludge using a radiotracer. Water Res. 39 (10), 2125–2135.
- Diplas, P., Papanicolaou, A.N., 1997. Batch analysis of slurries in zone settling regime. J. Environ. Eng. 123 (7), 659–667.

- Dupont, R., Henze, M., 1992. Modelling of the secondary clarifier combined with the activated sludge model no. 1. *Water Sci. Technol.* 25 (6), 285–300.
- ont, R., 1991. Analysis of the batch sedimentation test. *Chem. Eng. Sci.* 46 (10), 2473–2482.
- Font, R., Laveda, M.L., 2000. Semi-batch test of sedimentation. Application to design. *Chem. Eng. J.* 80, 157–165.
- Hartel, L., Popel, H.J., 1992. A dynamic secondary clarifier model including processes of sludge thickening. *Water Sci. Technol.* 25 (6), 267–284.
- Holdich, R.G., Butt, G., 1997. Experimental and numerical analysis of a sedimentation forming compressible compacts. *Separation Sci. Technol.* 32 (13), 2149–2171.
- Jin, B., Wilen, B.-M., Lant, P., 2003. A comprehensive insight into floc characteristics and their impact on compressibility and settleability. *Chem. Eng. J.* 95 (1–3), 221–234.
- Karl, J.R., Wells, S.A., 1999. Numerical model of sedimentation/ thickening with inertial effects. *J. Environ. Eng.* 125 (9), 792–806.
- Kinnear, D.J., 2002. Biological solids sedimentation: a model incorporating fundamental settling parameters. Ph.D. Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Utah.
- Mines, R.O., Vilagos, J.L., Echelberger, W.F., Murphy, R.J., 2001. Conventional and AWT mixed-liquor settling characteristics. *J. Environ. Eng.* 127 (3), 249–258.
- Otterpohl, R., Freund, M., 1992. Dynamic models for clarifiers of activated sludge plants with dry and wet weather flows. *Water Sci. Technol.* 26 (6), 1391–1400.
- Shih, Y.T., Gidaspow, D., Wasan, D.T., 1986. Sedimentation of fine particles in nonaqueous media: Part I—Experimental, Part II—Modeling. *Colloids and Surfaces* 21, 393–429.
- Shirato, M., Kato, H., Kobayashi, K., Sakazaki, H., 1970. Analysis of settling of thick slurries due to consolidation. *J. Chem. Eng. Japan* 3 (1), 98–104.
- Takacs, I., Patry, G.G., Nolasco, D., 1991. A dynamic model of the clarification-thickening process. *Water Res.* 25 (10), 1263–1271.
- Vesilind, P.A., 1968. Discussion of 'Evaluation of activated sludge thickening theories' by Dick, R.I., Ewing, B.B. *J. Sanitary Eng. Div. ASCE* 94 (SA1), 185–191.
- Zheng, Y., Bagley, D.M., 1998. Dynamic model for zone settling and compression gravity thickeners. *J. Environ. Eng.* 124 (10), 953–958.
- Zheng, Y., Bagley, D.M., 1999. Numerical simulation of batch settling process. *J. Environ. Eng.* 125 (11), 1007–1013.